

## ПРО ОБМЕЖЕННЯ ЗАСТОСУВАННЯ КОНЦЕПЦІЇ КРИТИЧНОЇ ВІДСТАНІ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ВТОМНОЇ МІЦНОСТІ ЗА НАЯВНОСТІ КОНЦЕНТРАТОРІВ НАПРУЖЕНЬ

О.М.Герасимчук, О.В.Кононученко

Інститут проблем міцності імені Г.С.Писаренка НАН України, Київ, Україна

**Abstract.** In order to assess the fatigue strength in the presence of a notch in the form of a hole, the concept of critical distance as the single parameter for a given material can be successfully used only if the radius of such a hole does not exceed a certain critical value. A formula is proposed for estimating this value depending on the characteristics of the material and the stress concentration factor.

**Вступ.** Втомна міцність зразків та елементів конструкцій за наявності концентратора напружень аналізується за допомогою різних підходів залежно від геометрії концентратора. Для оцінки втомної міцності за наявності «тупих» та «мілких» концентраторів напружень (теоретичний коефіцієнт концентрації напружень  $K_t \leq 4$ ) добре себе зарекомендувала концепція критичної відстані [1]. Натомість для інших типів концентраторів («гострих» і «глибоких»,  $K_t > 4$ ) втомна міцність може визначатись пороговим розмахом прикладеного напруження, за якого у вершині концентратора ініціюється втомна тріщина, що проростає до певного розміру і припиняє подальше поширення внаслідок поступово зростаючого ефекту закриття тріщини. У таких випадках для аналізу втомної міцності пропонуються підходи з використанням діаграми Кітагави-Такагасі (КТ-діаграми) [2].

Окрім вищевказаного обмеження застосування концепції критичної відстані для окремого типу концентраторів напружень (тільки для тупих) може бути ще й обмеження за їхніми розмірами. **Метою** даного дослідження було визначення такого обмеження на прикладі аналізу результатів випробувань на втому сталених зразків із глухим отвором різного діаметру.

**Експериментальні результати та їх аналіз.** Випробування на багатоциклову втому проводились на магнітно-резонансній машині RUMUL Testronic 50kN в режимах розтяг-стиск ( $R=-1$ ) та розтяг-розтяг ( $R=0,1$ ) за нормальних умов. Випробовувались плоскі зразки зі сталі 45: гладкі та з глухим отвором діаметром  $2\rho=0,6$  мм і  $2\rho=1,6$  мм. Результати втомних випробувань наведено на рис. 1 у координатах: прикладене номінальне максимальне напруження циклу  $\sigma_{max}$  проти кількості циклів до руйнування  $N$ .

З рис. 1 видно, що наявність концентратора напружень знижує характеристики опору втомі зразків порівняно з гладкими зразками. У той же час зразки з отвором діаметром  $2\rho=1,6$  мм мають вищі характеристики опору втомі, ніж зразки з отвором  $2\rho=0,6$  мм. Тобто, графік залежності границі витривалості  $\sigma_{th}$  від глибини концентратора  $D = \rho$  має вигляд, як показано на рис. 2,а Таку аномальну, на перший погляд, поведінку матеріалу за наявності однотипних концентраторів напружень, які слід вважати тупими можна пояснити, виходячи з наступних міркувань.

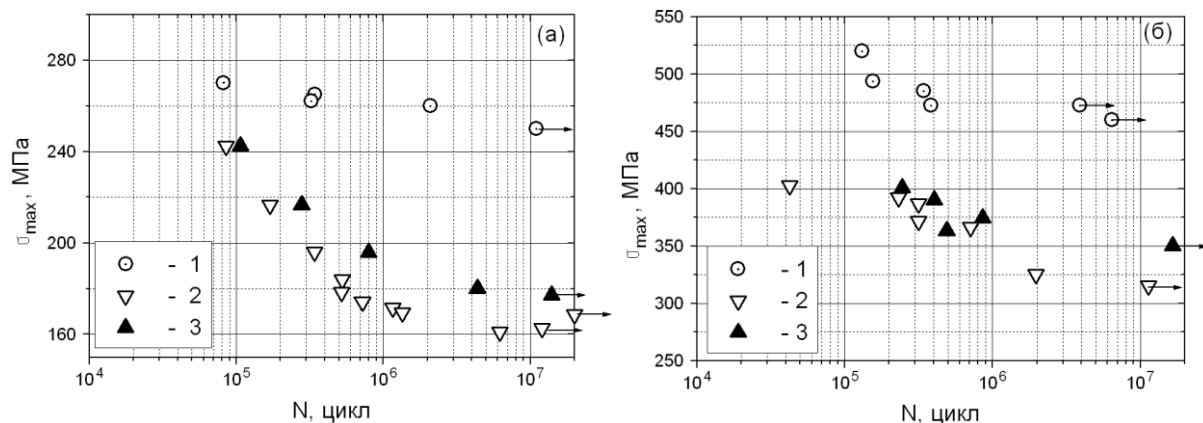


Рис. 1. Результати випробувань на втому зразків зі сталі 45. а –  $R = -1$ ; б –  $R = 0,1$ .  
1 – гладкі зразки, 2 – зразки з отвором  $2\rho = 0,6$  мм, 3 – зразки з отвором  $2\rho = 1,6$  мм.

На рис. 2,б наведено пружні розподіли локальних напружень у відносних одиницях в околі отворів обох вищевказаних розмірів за однакового прикладеного розмаху номінальних напружень для даних зразків зі сталі 45. Для порівняння на графіках наведено розподіл, визначений методом скінчених елементів (МСЕ), та розподіл за рівнянням Лукаша-Клесніла:

$$\sigma_{loc}(x) = \sigma_{nom} \cdot K_t / \sqrt{1 - 4,5x / \rho} . \quad (1)$$

Два методи визначення локальних напружень дають приблизно однакову картину їхнього розподілу у межах зони впливу концентратора. На графіках рис. 2,б вказано також розмір критичної відстані  $l_c = 1,75 \cdot 10^{-4}$  м, розрахований за рівнянням (2) [1]:

$$l_c = E^2 b / \sigma_{-1,e}^2 . \quad (2)$$

При цьому використовувались наступні вихідні дані: експериментально встановлена границя витривалості гладких зразків зі сталі 45 для симетричного циклу навантаження  $\sigma_{-1,e} = 250$  МПа, модуль пружності для сталі 45  $E = 2,1 \cdot 10^5$  МПа, модуль вектора Бюргерса для сталей  $b = 2,48 \cdot 10^{-10}$  м.

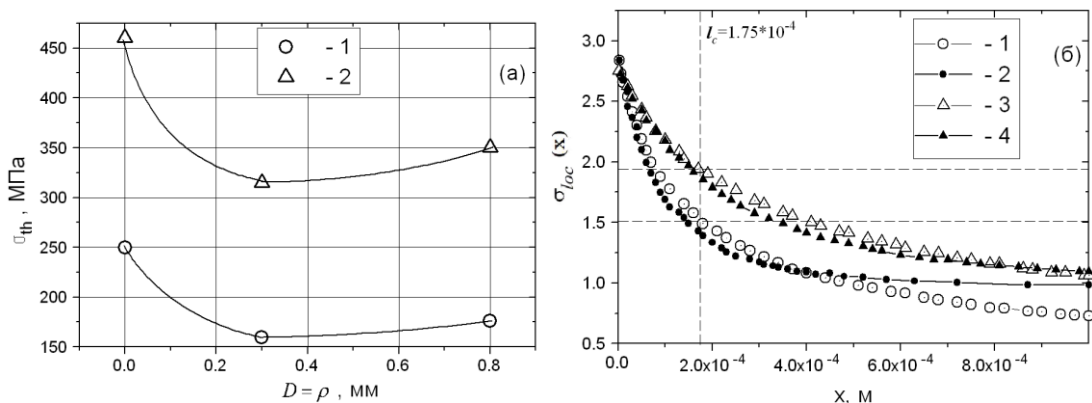


Рис. 2. а – Залежність границі витривалості  $\sigma_{th}$  від радіуса отвору  $\rho$  для сталі 45: 1 –  $R = -1$ , 2 –  $R = 0,1$ . б – Пружні розподіли локальних напружень в околі глухого отвору радіусом  $\rho$ : 1, 2 –  $\rho_1 = 0,3$  мм; 3, 4 –  $\rho_2 = 0,8$  мм; 1, 3 – рів. (1), 2, 4 – МСЕ.

Як видно з рис. 2,б, розподіл локальних напружень для більшого отвору має менший градієнт, внаслідок чого за однакових номінальних напружень локальне напруження на критичній відстані для більшого отвору вище, ніж локальне напруження для меншого отвору. Тому очевидно, що границі витривалості для зразків із вказаними розмірами однотипних отворів досягаються за різними механізмами, які й призводять до такої картини, яка зображена на рис. 2,а. Реалізацію цих двох різних механізмів схематично наведено на рис. 3.

Для меншого концентратора виконується теорія критичної відстані. Тобто границя витривалості  $\sigma_{th,1}$  зразків із концентратором такої глибини  $D_1$  дорівнює такому номінальному напруженню  $\sigma_{nom,1}$ , за якого локальне напруження на критичній відстані  $\sigma_{loc,1}(l_c)$  дорівнює границі витривалості гладких зразків  $\sigma_{R,e}$ . У цьому випадку на рівні границі витривалості або зовсім не виникає тріщини втоми, або утворюється втомна тріщина, що не перевищує розмір зерна  $d$ , як це відбувається й у гладких зразках [1]. Так, якщо у рівняння (1) підставити  $\sigma_{loc}(l_c) = 250$  МПа (значення границі витривалості гладких зразків для  $R = -1$ ),  $K_t = 2,874$  (нетто,  $K_t = \sigma_{nom} / \sigma_{loc}(x=0)$ ),  $x = l_c = 1,75 \cdot 10^{-4}$  м,  $\rho = 0,3 \cdot 10^{-3}$  м, отримаємо  $\sigma_{nom,1} = 165$  МПа, що відповідає визначеній експериментально для  $R = -1$  границі витривалості зразків із отвором такого розміру.

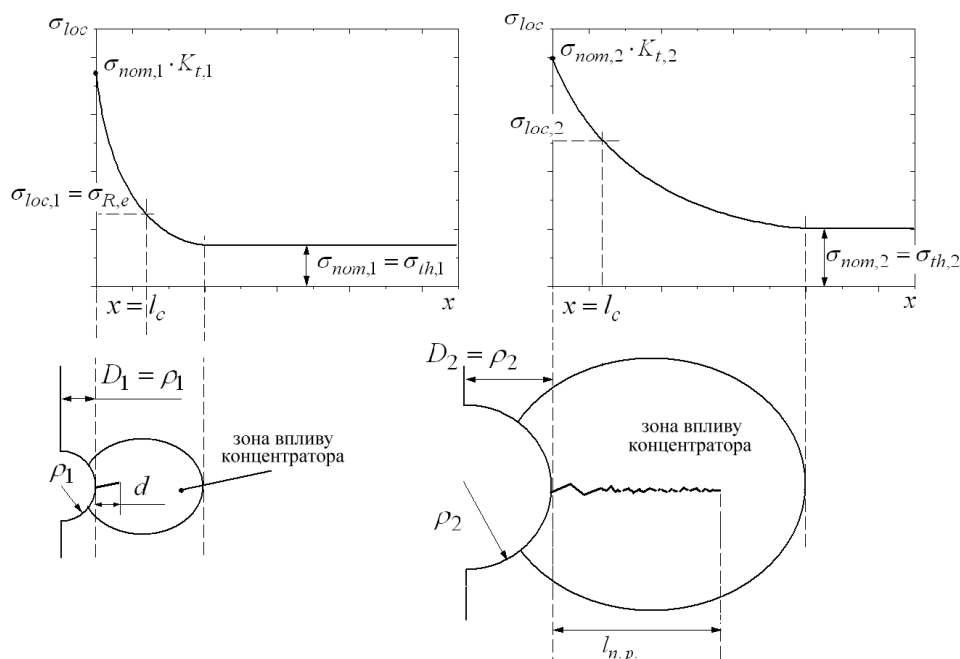


Рис. 3. Два механізми досягнення границі витривалості зразків із однотипними тупими концентраторами напружень,  $K_{t,1} = K_{t,2} = 3$  (брутто,  $K_t = 1 + 2\sqrt{D/\rho}$ ), різної глибини.

Для зразків із концентратором глибиною  $D_2 = \rho_2 = 0,8$  мм за прикладеного номінального напруження  $\sigma_{nom,2}$  локальне напруження на критичній відстані  $\sigma_{loc,2}(l_c)$  більше, ніж границя витривалості гладких зразків  $\sigma_{R,e}$  (див. також рис. 2,б). Тому в цьому випадку тріщина втоми, що утворюється, росте під дією цього високого спочатку і поступово спадаючого локального напруження і потім зупиняється внаслідок такого градієнту локальних напружень та поступово зростаючого ефекту закриття тріщини. Таким чином, таке прикладене номінальне напруження  $\sigma_{nom,2}$ , яке вище від  $\sigma_{nom,1}$ , і є границею витривалості  $\sigma_{th,2}$  зразків із даним концентратором. Отже, у цьому випадку єдиний параметр критичної відстані не придатний для розрахунку границі витривалості зразків із тупим концентратором. Натомість, оскільки у цьому випадку границя витривалості визначається пороговим напруженням за наявності тріщини  $l_{n.p.}$ , що проросла від вершини концентратора і зупинилась внаслідок зростаючого ефекту закриття тріщини, оцінку такого порогового напруження слід проводити з використанням модифікованої КТ-діаграми, як було запропоновано наприклад у [2].

Вищеописане пояснення можна також представити за допомогою КТ-діаграми у вигляді граничних кривих порогових напружень, які схематично наведено на рис. 4 у координатах: номінальне порогове напруження  $\sigma_{th}$  проти розміру тріщини  $l$  від

вершини концентратора. Тобто максимум кривої порогових напружень для концентратора глибиною  $D_2$  знаходиться вище від максимуму такої кривої для  $D_1$ , вказуючи при цьому на більший розмір  $l_{n.p.}$  тріщини, що не розповсюджується.

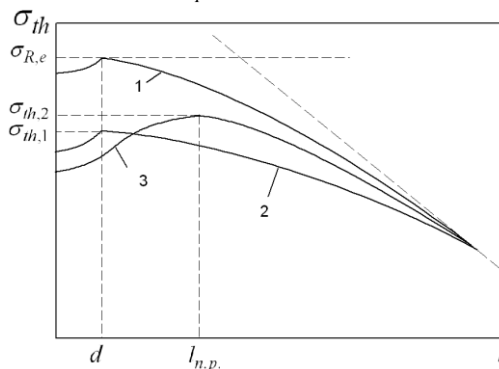


Рис. 4. Порівняння граничних кривих порогових напружень для досліджених зразків: 1 – для гладких зразків; 2 – для зразків з отвором  $2\rho = 0,6$  мм; 3 – для зразків з отвором  $2\rho = 1,6$  мм.

Таким чином, окрім поділу концентраторів на *тупі* та *гострі*, тупі концентратори необхідно розділяти на *мілкі* та *глибокі*. Межею розділу на мілкі та глибокі тупі концентратори може слугувати критична глибина  $D_c$ , формула для розрахунку якої пропонується у наступному вигляді:

$$D_c = l_c \sqrt{K_t}. \quad (3)$$

Формула (3) містить параметри  $D_c$  та  $K_t$ , які характеризують геометрію концентратора, а параметр  $l_c$  є характеристикою матеріалу. Ця формула може бути використана також для визначення критичного теоретичного коефіцієнта концентрації напружень  $K_{t,c}$  для концентраторів однакової глибини  $D$  при побудові діаграм Фроста, а саме:

$$K_{t,c} = (D/l_c)^2. \quad (4)$$

Тобто, за рівнянням (4) визначається  $K_{t,c}$ , вище від якого за наявності концентратора однакової глибини  $D$  і різної гостроти  $D/\rho$  границя витривалості даного матеріалу залишається незмінною. З рівняння (4) випливає також, що вищевказана межа поділу концентраторів на тупі та гострі,  $K_t = 4$ , є доволі умовною і залежить від геометричних розмірів концентратора та характеристик матеріалу. Як свідчать експериментальні дані, що є в літературі, це значення  $K_t$  знаходиться у межах від 2 до 5.

За подальшого збільшення розміру отвору,  $D \gg D_c$  і  $K_t < (1,3 \dots 1,1)$  (нетто), градієнт локальних напружень зменшуватиметься, а зона впливу концентратора збільшуватиметься, і за певного розміру  $D \geq D_{max}$  границя витривалості  $\sigma_{th}$  знову визначатиметься локальним напруженням на критичній відстані від вершини отвору, наближаючись до границі витривалості гладких зразків  $\sigma_{R,e}$ . Або, оскільки градієнт при цьому незначний і у рівнянні (1)  $(x/\rho = l_c/\rho) \rightarrow 0$ , ще простіше:  $\sigma_{th} = \sigma_{R,e}/K_t$ .

#### Література.

1. Herasymchuk O.M. Fatigue life calculation for titanium alloys considering the influence of microstructure and manufacturing defects / O.M.Herasymchuk, O.V.Kononuchenko, V.I.Bondarchuk. // Int. J. Fatigue. – 2015. – №81. – С.257–264.
2. Герасимчук О.М. Застосування модифікованої КТ-діаграми для оцінки втомної міцності за наявності концентратора напружень / О.М. Герасимчук // Пробл. міцності. – 2018. – №4. – С.114–127.